ASSOCIATION FRANÇAISE POUR L'AVANCEMENT DES SCIENCES

LES

GRANDES CONSTRUCTIONS

MÉTALLIQUES

CONFÉRENCE

FAITE PAR

G. EIFFEL

VICE-PRÉSIDENT DE LA SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS CIVILS

à l'Association française pour l'avancement des sciences, le 10 mars 1888.

PARIS

IMPRIMERIE ET LIBRAIRIE CENTRALES DES CHEMINS DE FER

IMPRIMERIE CHAIX

SOCIÉTÉ ANONYME AU CAPITAL DE SIX MILLIONS

Rue Bergère, 20

1888

ASSOCIATION FRANÇAISE POUR L'AVANCEMENT DES SCIENCES

LES GRANDES CONSTRUCTIONS MÉTALLIQUES

CONFÉRENCE

FAITE PAR

G. EIFFEL

VICE-PRÉSIDENT DE LA SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS CIVILS

à l'Association française pour l'avancement des sciences, le 10 mars 1888.

PARIS

IMPRIMERIE ET LIBRAIRIE CENTRALES DES CHEMINS DE FER

IMPRIMERIE CHAIX

SOCIÉTÉ ANONYME AU CAPITAL DE SIX MILLIONS

Rue Bergère, 20

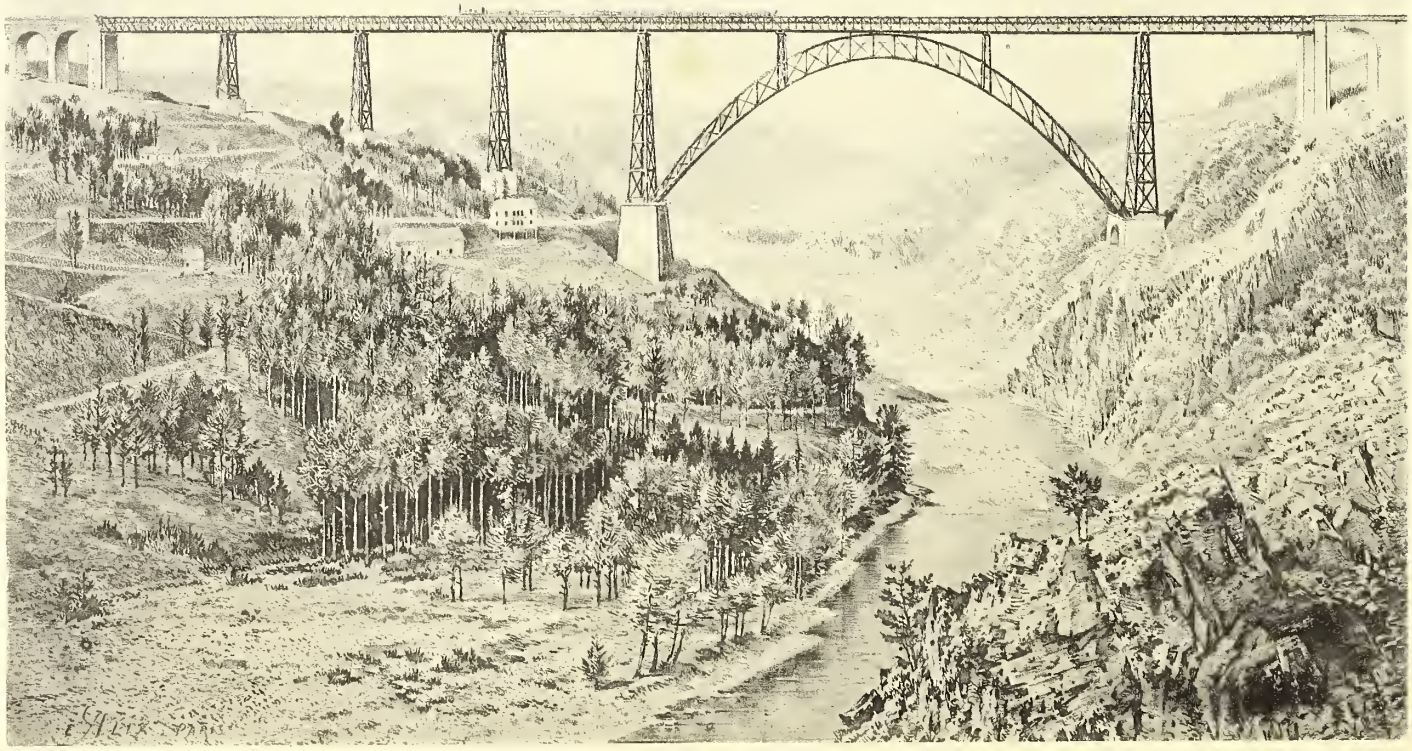
1888

Digitized by the Internet Archive
in 2017 with funding from
Getty Research Institute

https://archive.org/details/lesgrandesconstr00eiff

Viaduc de Garabit

Exécuté par G. EIFFEL, Ingénieur Constructeur



ALBUMS INDUSTRIELS E. ALIX, 141 B. Sébastopol PARIS

Longueur totale de l'ouvrage 564^{m} 00

Ouverture de l'arc 165^{m} 00 _ Hauteur du rail au dessus de l'eau 124^{m} 00

LES

GRANDES CONSTRUCTIONS

MÉTALLIQUES

Mesdames, Messieurs,

J'ai entrepris la tâche de vous parler aujourd'hui des grandes constructions métalliques. C'est un bien vaste sujet qu'il est difficile de condenser dans les quelques instants d'attention que vous voulez bien me consacrer.

Ces constructions jouent, en effet, actuellement un rôle considérable dans l'art de l'ingénieur. Elles ont rendu possible la réalisation d'une foule de problèmes de construction, que l'on n'aurait pas même songé à aborder dans la première moitié de ce siècle, et leur emploi s'est d'autant plus répandu que des besoins nouveaux se sont manifestés par l'extension des chemins de fer et la création des hardis ouvrages d'art qu'ils nécessitent. En outre, la science spéciale qui régit ces constructions a d'autant plus captivé l'esprit des ingénieurs, en les incitant à de nouvelles applications et à de nouvelles recherches, qu'elle présente des méthodes à l'aide desquelles on peut soumettre au calcul, avec une précision et une sûreté complètes, les différentes pièces, si minimes qu'elles soient, qui entrent dans la composition de ces grands ouvrages.

L'ensemble de ces méthodes constitue une science toute récente, dans laquelle la France tient une grande place, parce que ce sont ses mathématiciens et ses ingénieurs qui, en dehors de tout empirisme, mais en appuyant les principes de leurs déductions sur la base solide d'expériences fondamentales minutieusement vérifiées, en ont déterminé les lois avec une telle précision qu'aucun des faits de la pratique n'est venu une seule fois les infirmer.

Je ne puis donc qu'effleurer ce sujet en vous présentant une rapide analyse des progrès qui se sont accomplis successivement, et en appelant votre attention sur quelques-uns des grands ouvrages qui s'exécutent actuellement.

Mais tout d'abord, je vous prie de m'excuser à l'avance, si je me trouve conduit à citer, peut-être trop souvent, quelques-uns des travaux que j'ai moi-même exécutés. N'y voyez que mon désir de tâcher de vous intéresser en vous parlant de ceux que je connais le mieux.

Vous me permettrez d'entrer en matière par quelques brèves considérations sur les matériaux employés dans les constructions en général et sur le rôle spécial de la fonte, du fer et de l'acier.

L'emploi du fer est, comme vous le savez, des plus anciens ; mais il était loin d'égaler celui du bois ou de la pierre, que la nature met à la disposition de l'homme tout préparés pour être façonnés suivant ses besoins. Aussi ces derniers sont-ils restés longtemps les seuls matériaux de construction, tandis que la difficulté de fabriquer le fer en grande quantité et de lui donner, avec les faibles moyens dont on disposait, les formes voulues, en restreignait singulièrement l'emploi.

Ce n'est que pour les petites pièces, qui exigeaient une résistance tout à fait spéciale, que l'on arrivait à grand'peine à le forger à la main.

A notre époque, les progrès de la métallurgie et la vapeur, qui a transformé tant de choses, mettent à notre disposition des ressources presque illimitées, soit pour façonner et travailler le fer avec une extrême facilité, soit pour nous procurer des métaux ayant des propriétés bien définies et une résistance exactement connue.

Il va sans dire que le fer ne pourra jamais remplacer entièrement la pierre et le bois, qui ont leurs qualités particulières; mais il y a eu, dans ces dernières années, une lutte constante, et le fer a envahi de plus en plus le domaine de la grande construction, dont il est aujourd'hui un des principaux matériaux.

Quels sont donc les avantages du métal ?

C'est, en premier lieu, sa *résistance*.

Au point de vue des charges que l'on peut faire supporter avec sécurité à l'un ou l'autre de ces matériaux, on sait, qu'à surface égale, le fer est dix fois plus résistant que le bois et vingt fois plus résistant que la pierre.

C'est dans les grandes constructions surtout que la résistance du métal le rend supérieur aux autres matériaux. Le poids propre de l'ouvrage y joue, en effet, un rôle considérable : il limite les hauteurs et les portées que l'on peut atteindre.

La légèreté relative des constructions métalliques permet, en même temps, de diminuer l'importance des supports et des fondations.

Pour ne citer qu'un exemple, celui de la Tour de l'Exposition, j'ai étonné plus d'une personne qui s'inquiétait de la charge sur le sol des fondations, en disant qu'il ne serait pas plus chargé que celui d'une maison de Paris.

Ces avantages que présente le métal croissent naturellement avec les dimensions des constructions.

Mais l'incomparable supériorité du métal, sans laquelle tout le reste serait peu de chose, est son *élasticité*, qui lui permet, comparativement à la pierre, de résister aussi bien aux efforts de tension qu'aux efforts de compression.

Avec la pierre, on ne peut constituer qu'un nombre limité de systèmes, dans la conception desquels nos pères ont excellé et où ils ont atteint, dans les monuments qu'ils nous ont légués, cathédrales ou palais, les extrêmes limites de l'ingéniosité et de la hardiesse.

Nous ne pouvons faire mieux qu'eux en ce genre. Notre tâche est de faire autrement, avec des matériaux différents.

Le bois, évidemment, a bien quelques-unes des qualités d'élasticité dont je parle, mais ce n'est que pour un temps fort limité; il se détériore très vite à l'air, tandis qu'avec le fer, mis à l'abri de la rouille, on peut être assuré d'une très longue durée.

On a émis des craintes à ce sujet, surtout quand les constructions sont soumises à des charges roulantes qui leur imposent des vibrations répétées.

Toutes ces craintes sont fort exagérées, au moins dans les cas où ces efforts ne sont pas relativement grands.

Il a été fait notamment à Berlin, par M. Wœhler, des expériences qui ont duré plusieurs années; ces expériences très intéressantes ont démontré, il est vrai, qu'on arrive, par des applications de charges répétées un très grand nombre de fois, à rompre le fer avec une charge inférieure à la charge qui aurait primitivement provoqué la rupture; mais elles ont prouvé, en même temps, que, si ces charges ne dépassent pas le cinquième de la charge

de rupture, on n'arrive pas à produire cette dernière, même pour un nombre de fois infiniment grand de leur application.

Nous avons, du reste, sous les yeux l'exemple d'une construction métallique, qui a subi un nombre considérable de vibrations. Je veux parler du pont d'Asnières, construit en 1852 et qui, depuis cette époque, livre passage à des centaines de trains par jour, sans que rien fasse supposer qu'il ait perdu de sa résistance depuis le jour où il a été construit.

Nous pouvons donc être rassurés sur le sort futur de nos constructions métalliques, à condition, bien entendu, qu'on les préserve de la rouille qui est leur ennemie mortelle.

Je n'ai fait mention, jusqu'ici, que du fer, mais les constructions métalliques peuvent aussi être établies en fonte ou en acier.

Celles en fonte sont les plus anciennes, puis sont venues les constructions en fer et, tout récemment, celles en acier.

Si l'on fait la comparaison entre ces trois métaux, on peut dire que, dans les grands travaux, l'emploi de la fonte tend à disparaître, sauf comme colonnes ou supports, parce qu'elle résiste très mal aux efforts de traction, vis-à-vis desquels elle se comporte à peu près comme la pierre.

En outre, elle est, en général, très cassante sous l'influence des chocs.

Les propriétés de l'acier sont plus difficiles à définir, c'est un métal d'une résistance et de propriétés très variables ; sa résistance à la rupture varie du simple au double, suivant son mode de préparation ; sa résistance au choc est, en général, d'autant plus faible que son point de rupture est plus élevé.

La résistance de l'acier, employé aujourd'hui dans les constructions, n'est pas très supérieure à celle du fer, mais sa supériorité consiste en ce que sa limite d'élasticité, c'est-à-dire le point où les déformations subsistent sous l'effet d'une charge, est beaucoup plus élevée que pour le fer.

La fabrication de l'acier est très délicate, et ce n'est que dans ces dernières années qu'on est arrivé à produire un métal dont on soit absolument sûr et qui réponde parfaitement aux qualités spéciales que l'on exige de lui.

Il y a une tendance, de jour en jour plus marquée, à remplacer dans les constructions le fer par l'acier, et il existe déjà un grand nombre d'ouvrages d'art très importants en acier.

On peut, je crois, dire sans se tromper que l'acier est le métal de l'avenir.

Ceci dit sur les propriétés principales des matériaux entrant dans les constructions métalliques, j'arrive à mon sujet principal, qui est la construction des ponts, des charpentes et de divers ouvrages.

Les ponts peuvent se classer en trois types principaux :

1° Les ponts en arc,

2° Les ponts suspendus,

3° Les ponts à poutres droites ou courbes.

Les ponts en arc ont d'abord été établis en fonte, avec des voussoirs travaillant à la compression comme des voussoirs en pierre.

Ces premiers ponts métalliques sont, en quelque sorte, le trait d'union entre l'emploi de la pierre et celui du métal et ont naturellement été construits en Angleterre, où la métallurgie a réalisé ses premiers progrès.

Le premier fut établi, il y a juste cent ans, par un ingénieur nommé Darby, qui établit une arche de 30 mètres de portée à Cool Brookdale.

Depuis, il en a été construit un nombre considérable, parmi lesquels nous citerons, en France, le pont des Arts en 1803, l'ancien pont d'Austerlitz en 1806, plus tard le pont du Carrousel en 1835, et enfin toute une série de ponts d'un même type : les ponts de Solférino, de Saint-Louis, de Sully sur la Seine (1859).

Parmi ceux-ci, le pont Saint-Louis a la plus grande portée (64 mètres).

Quelques-uns de ces ponts sont très beaux et d'un grand aspect décoratif.

Les ponts en arc en fer ne se sont développés que beaucoup plus tard et nous y reviendrons tout à l'heure.

Mais si l'on veut suivre l'ordre chronologique dans l'histoire des ponts métalliques, je devrai vous parler d'abord des ponts suspendus, dans lesquels les matériaux, au lieu d'être comprimés, comme dans les ponts en arc en fonte, sont au contraire tous tendus.

Quant à leur origine, c'est, paraît-il, en Amérique qu'il faut aller la chercher.

Dans les temps les plus reculés, les indigènes se servaient de lianes fixées aux deux rives pour traverser les ravins ou les rivières ; plus tard les lianes furent remplacées par des cordes, puis par des chaînes. Mais ce n'est que tout à fait à la fin du siècle dernier que fut appliquée, en Amérique, l'idée

de suspendre à ces chaînes un plancher horizontal. Néanmoins, les applications en furent très restreintes et sans importance.

C'est encore en Angleterre, vers 1820, que la première grande application de ce système fut faite, au pont de Berwick, sur la Tweed.

On réalisa la plus grande portée qui ait jamais alors été franchie : ce pont a, en effet, une portée de 110 mètres. Quatre ans plus tard, on fut encore plus hardi, et pour traverser le détroit de Menai, on atteignit une portée de 177 mètres.

Comme innovation capitale, on remplaça les chaînes, d'un forgeage difficile et minutieux, par des câbles métalliques composés d'un grand nombre de fils, dont chacun avait une résistance considérable par rapport à sa section.

Ce fut une véritable révolution dans l'art et, depuis lors, la construction des ponts suspendus entra définitivement dans le domaine de l'ingénieur et se répandit dans toute l'Europe. On a élevé successivement les ponts de Fribourg, de 271 mètres de portée, en 1834; en Hongrie, le pont de Pest; en France, le pont de la Roche-Bernard, de 198 mètres de portée, et ensuite un nombre considérable d'autres ponts de 100 à 200 mètres d'ouverture, auxquels les frères Séguin attachèrent leur nom.

Les ponts suspendus présentent, en général, l'inconvénient de manquer de raideur et ils oscillent très facilement; mais cet inconvénient, qui est la cause principale de la disgrâce dans laquelle ils sont tombés en France, à la suite de nombreuses catastrophes, peut être écarté, si l'on munit le pont d'un tablier suffisamment rigide et si l'on rend, par des liaisons convenables avec le tablier, les câbles de support peu déformables.

C'est ce qu'ont admirablement compris les Américains, qui se sont appliqués à perfectionner le type de ponts suspendus que nous connaissons en France et qui sont arrivés aux résultats les plus remarquables, en y faisant passer avec sécurité même des trains de chemins de fer, ce devant quoi on a toujours reculé en Europe.

Parmi les grands ponts suspendus construits dans ce nouvel ordre d'idées, on peut citer le pont du Niagara, construit en 1855, qui sert de passage en même temps à une voie de chemin de fer et à une voie charretière placées l'une au-dessus de l'autre. Il a une portée de 250 mètres.

L'exemple le plus remarquable est le pont qui vient d'être terminé, sur la rivière de l'Est, pour relier New-York à Brooklyn :

Les proportions vraiment grandioses de cet ouvrage méritent une mention toute spéciale.

Sa longueur totale est de 1 832 mètres. La travée centrale a 486^{m},90 et les deux travées voisines ont 286^{m},70. Il comprend deux voies de chemin de fer funiculaire, un passage de piétons et deux passages de voitures; sa largeur totale est de 25^{m},50.

Les câbles qui portent toute la construction sont au nombre de quatre; ils sont en acier. Chacun d'eux est composé de 5 296 fils de 3 millimètres de diamètre formant 19 câbles de 75 millimètres, qui sont réunis en un câble unique de 0^{m},48 de diamètre.

Chaque faisceau de fils est un écheveau continu de 320 kilomètres passant d'ancrage en ancrage.

Les premiers fils posés par-dessus la rivière ne l'ont pas été sans difficulté, à cause de la portée et de la circulation constante des navires.

Le reste du travail était relativement facile et s'est fait au moyen de chariots mus des deux rives et roulant sur les fils déjà passés.

Le poids total de toute la travée centrale suspendue est de 6 740 tonnes.

Les travaux de cet immense ouvrage ont été commencés en 1867 par John A. Rœbling, l'auteur du projet, qui mourut en 1869 et fut remplacé par son fils.

Les ponts suspendus se prêtent admirablement aux grandes portées à cause de leur légèreté relative, qui est due à la résistance des fils d'acier, laquelle est bien supérieure à celle de l'acier ou du fer laminé.

On fabrique maintenant couramment des fils qui résistent à 120 et même à 150 kilos par millimètre carré, tandis que la résistance du fer employé dans les ponts n'est que de 35 kilos et celle de l'acier de 45 kilos environ.

Aussi ces ponts, qui ont rendu en France d'incontestables services par l'économie de leur construction, n'y ont-ils pas dit leur dernier mot, et beaucoup d'ingénieurs songent à y revenir en s'inspirant des progrès que les Américains ont réalisés dans leur construction.

Les ponts en tôle, c'est-à-dire les ponts composés de fers laminés et assemblés entre eux au moyen de rivets, n'ont fait leur apparition que bien après les ponts en fonte et les ponts suspendus, et c'est encore en Angleterre, le pays du métal, qu'il faut chercher leur origine.

Harrison fut le premier constructeur qui employa le fer laminé dans les ponts en 1844; Fairbairn prit, en 1846, un brevet pour les poutres en fer creux et érigea, à la même époque, plusieurs ponts sur différents chemins de fer anglais.

Quoique d'une date récente, les ponts en tôle sont actuellement les plus nombreux. En quarante ans, on a fait dans ce genre de construction des progrès étonnants.

Il a fallu d'abord créer une science nouvelle, si importante aujourd'hui, *la résistance des matériaux*, au développement de laquelle un grand nombre de savants ont consacré leur vie entière.

Ce n'est, en effet, qu'à grand'peine que l'on est arrivé à déterminer les dimensions des premières poutres construites, qui se calculent si simplement aujourd'hui.

Les ingénieurs anglais se sont passés presque entièrement des calculs et ils ont déterminé les dimensions de leurs pièces par des tâtonnements et des essais nombreux, en étudiant les phénomènes précédant la rupture sur des modèles de dimensions réduites.

Aujourd'hui, la résistance des matériaux, établie sur des bases mathématiques, permet de calculer exactement la moindre des pièces, d'étudier les dispositions les plus avantageuses et d'arriver ainsi à des constructions bien plus légères et en même temps plus solides que celles que l'on faisait au début.

A l'origine, on multipliait le nombre des pièces résistantes et l'on compliquait ainsi les systèmes; aujourd'hui, on a la tendance, au contraire, à les simplifier autant que possible, car plus un système est simple, plus on est sûr de la répartition exacte des efforts.

Un exemple frappant de cette tendance se voit dans les poutres à treillis. Au début, le treillis était à mailles très serrées, comme le pont de Kehl; le nombre de ces mailles a été peu à peu en diminuant et, aujourd'hui, on ne fait que des poutres à grandes mailles et le treillis n'est plus formé que par des croix de Saint-André ou même par de simples diagonales.

La construction du pont Britannia, sur le détroit de Menai, en Angleterre, est venue revéler subitement tout le parti que l'on peut tirer de la tôle dans la construction des ponts.

Ce bel ouvrage, qui ouvre pour ainsi dire, l'ère des ponts en fer, fut

achevé en 1850 et se compose de deux travées centrales de 144 mètres et de deux travées de rive de 74 mètres.

Du premier coup on a atteint en Angleterre des portées qui n'ont pas beaucoup été dépassées depuis.

La forme de ce pont est celle d'un grand tube à sections rectangulaires, à parois pleines, placé à une hauteur de 30 mètres au-dessus de la mer.

Il a été construit en entier sur des bateaux et hissé en place à l'aide de puissantes presses hydrauliques.

On a réalisé ainsi un admirable tour de force, tant par la hardiesse de l'ouvrage métallique lui-même que par celle de sa mise en place ; pour un coup d'essai, l'ingénieur anglais Robert Stephenson a fait un coup de maître.

En France, l'introduction des ponts en tôle date des ponts de Clichy et d'Asnières sur le chemin de fer de Saint-Germain, en 1852.

C'est à M. Flachat, alors ingénieur en chef de ce chemin de fer, que l'on doit les premières constructions métalliques, qui ont ensuite été appliquées sur une très grande échelle dans l'exécution des chemins du Midi.

Le pont sur la Seine, à Asnières, a cinq travées de 31^{m}, 40.

Ce pont est loin d'atteindre les dimensions du pont de Britannia ; mais, malgré ses dimensions modestes, il a réalisé cependant un grand progrès, tant par les dispositions adoptées, qui étaient théoriquement bien supérieures à celles du pont de Britannia, que par les calculs qui ont servi de base à son établissement et dont les méthodes, applicables aux ponts à poutres continues, sont demeurées classiques. C'est grâce à ces méthodes que, depuis, nous avons pu en toute connaissance de cause, ce qui est un des caractères de l'esprit des ingénieurs français, nous montrer aussi hardis que quiconque.

Les Anglais nous ont ainsi devancés dans la pratique, mais nous avons eu l'honneur, en France, de les dépasser de beaucoup dans la théorie et de créer des méthodes qui ouvraient au progrès une voie sûre et dégagée de tout empirisme.

Nous sommes, jusqu'à ces dernières années, restés fidèles à ce précédent, où la science allemande n'a fait que nous suivre et ce sont nos grandes maisons de construction qui ont, jusqu'à ces dernières années, établi, dans toutes les contrées de l'Europe, les plus grands ouvrages d'art métalliques.

En 1855, M. Flachat construisait encore le pont de Langon sur le chemin

de fer du Midi, dont la travée centrale avait 73 mètres de portée et qui est resté un type de bonne construction. Il en est de même pour le pont sur la Garonne, à Bordeaux, construit en 1859.

Ce pont, dont les poutres sont formées par de grands treillis à croix de Saint-André, a une longueur de 500 mètres et des travées de 77 mètres.

J'eus l'honneur d'en suivre la construction comme chef de service.

En France, on rencontre très peu de ponts en tôle autres que des ponts à poutres droites; pour des portées moyennes, c'est la forme la plus simple et, en général, la plus économique, surtout lorsque le pont a une certaine longueur et plus de deux appuis. Dans ce dernier cas, le montage du pont, qui est souvent une des parties les plus difficiles de la construction, peut se faire sur les rives et le tablier complet se lance par-dessus la rivière.

J'opérai ainsi pour le viaduc de la Tardes, qui franchit une travée de 100 mètres à 92 mètres au-dessus du fond de la vallée; c'est la plus grande travée qui ait été mise en place par voie de lançage.

Les tabliers continus nous amènent à parler des piles métalliques.

Pour franchir les larges vallées, on est conduit, tout naturellement, à prendre des points d'appuis intermédiaires et, dans bien des cas, on réalise une grande économie en construisant ces appuis en métal; ils prennent alors le nom de *piles métalliques*.

Les premières piles métalliques ont été construites au viaduc de Crumlin, en 1853, dans le pays de Galles, elles ont $57^{m},95$ de hauteur; elles sont construites presque entièrement en fonte; les croix de Saint-André sont seules en fer.

Celles des viaducs de la ligne de Commentry à Gannat réalisent un sérieux progrès, en raison du soin avec lequel leur ingénieur, M. Nordling, étudia les différents efforts qui se produisent dans une construction de ce genre.

Les dangers d'une étude insuffisante de ces efforts se sont montrés, il y a quelques années, au grand pont de la Tay, en Écosse, où un vent violent, agissant sur le tablier, renversa les piles en fonte qui le soutenaient, au moment du passage d'un train.

Les dernières piles qui ont été construites sont entièrement en fer; elles se composent généralement de quatre montants formant les arêtes d'un

tronc de pyramide et ces montants sont reliés dans les quatre faces par des croix de Saint-André et par des entretoises; on en trouve un exemple dans le viaduc de Garabit, sur lequel nous reviendrons plus loin.

La plus grande hauteur, que l'on ait atteinte en Europe pour les piles métalliques, est de 60 mètres; mais cette hauteur n'est pas une limite qui ne puisse être dépassée.

On trouve en Amérique des piles ayant plus de 75 mètres, notamment dans le viaduc de Varrugas au Pérou; nous avons nous-même présenté, dans un récent concours, pour la construction du viaduc du Viaur, un projet comportant des piles métalliques de 100 mètres de hauteur.

L'administration des Ponts et Chaussées ne s'est pas encore prononcée à ce sujet, mais j'ai toute confiance dans la possibilité d'exécuter en toute sécurité un pareil ouvrage.

Par analogie aux piles métalliques, qui sont surtout calculées pour résister aux efforts du vent, je puis citer la statue colossale de la Liberté, dressée par M. Bartholdi dans la rade de New-York. Cette statue a une hauteur de 46 mètres. La forme extérieure en est donnée par une mince enveloppe en cuivre qui vient s'attacher sur une charpente intérieure en fer dont nous avons déterminé toutes les pièces pour leur permettre de résister aux ouragans.

Mais revenons aux ponts, au sujet desquels j'aurais encore bien des choses à dire si je ne craignais de fatiguer votre attention.

Il m'est impossible de vous faire l'énumération des remarquables ouvrages établis dans le monde entier, constitués, dans leurs parties essentielles, par des poutres droites ou paraboliques et sans lesquels la construction de la plupart des chemins de fer eût été impossible.

Qu'il vous suffise de savoir que les plus grandes portées des ponts de ce type ont été réalisées en Hollande, au pont de Kuilenbourg, 150 mètres et, en Amérique, au pont sur l'Hudson, Pongh Keepsie, qui comporte six travées de 160 mètres.

Une des applications récentes des ponts à poutres droites a été faite pour les chemins de fer urbains, en Amérique.

C'est, à mon avis, suivant ces types, très améliorés, bien entendu, au point de vue de l'aspect, que devrait être construit notre futur chemin de fer métropolitain, qui, un jour ou l'autre, s'imposera avec une telle évidence que

l'on sera bien forcé de le construire, en mettant de côté toutes les objections de second ordre qu'on lui oppose actuellement.

Je ne veux pas entrer dans les détails des assemblages des pièces en fer qui constituent les ponts, vous me permettrez cependant de vous signaler que, à ce point de vue, les constructions américaines diffèrent essentiellement des constructions européennes.

En Amérique, toutes ces pièces sont assemblées au moyen d'axes et de boulons articulés, tandis qu'en Europe ces assemblages se font au moyen de rivets posés à chaud.

On arrive avec des axes à un montage très rapide en employant peu d'hommes, ce qui est un avantage précieux dans des pays où l'on se trouve quelquefois à des distances très grandes de tout lieu habité.

Ces articulations jouissent aussi, au point de vue théorique, de la propriété de déterminer exactement les lignes de passage des efforts, même pendant les déformations sous la charge.

Mais ces avantages sont compensés par bien d'autres inconvénients, dont le principal est le manque de rigidité, par suite des jeux qui tendent à se produire; en outre, si l'une des articulations vient à céder, la rupture d'un seul de ces boulons entraîne la ruine de tout le système; les exemples n'en sont que trop fréquents.

En France, et généralement en Europe, nous préférons les assemblages à rivets, qui constituent, quand ils sont bien étudiés, un assemblage parfait. Les rivets donnent une adhérence, entre les pièces qu'ils assemblent, telle que celles-ci ne forment plus, en réalité, qu'une pièce unique et que la résistance aux points assemblés est presque toujours plus grande que dans les parties courantes des pièces.

J'ai pu constater plusieurs fois que lorsqu'un pont rivé vient à être renversé par une force extérieure, l'eau ou le vent, ce ne sont presque jamais les attaches et les joints qui cèdent, mais les parties des pièces en dehors des assemblages.

Aussi je crois que nous ferons bien, pour nos grands ouvrages, de conserver nos habitudes, qui nous ont donné, entre des mains habiles, des ouvrages excellents, rigides, durables et qui ne le cèdent à aucun autre.

Nous avons parlé précédemment des ponts en arc en fonte, il nous reste à vous entretenir des arcs en fer.

La forme d'arc, qui a été la première employée, n'a pas vieilli et il y a un grand nombre de cas où elle s'impose.

De tous les systèmes de ponts, les arcs sont, sans contredit, les plus gracieux ; aussi, dans les villes, rencontre-t-on un grand nombre de ces ponts, destinés au passage des voitures. Au nombre de ces derniers, je citerai, tout d'abord, le pont d'Arcole, de 80 mètres de portée, construit en 1855, qui est remarquable par sa légèreté.

Mais on avait eu la malheureuse idée d'amarrer les longerons supérieurs à la maçonnerie, de manière que la construction travaillait à la fois comme un arc et comme deux consoles butées à leurs extrémités. Les tirants d'amarrage ayant cédé, par suite de la contraction due au froid et peut-être aussi par la rouille, les arcs se sont mis à porter en plein et il s'est produit des déformations qui vont exiger une réfection complète du pont, surtout dans les environs de la clef.

Le pont de Szegedin, que nous avons construit à la suite d'un concours entre tous les constructeurs de l'Europe, comprend une travée de 110 mètres surbaissée au treizième, qui est d'une légèreté très frappante.

Les arcs ont aussi l'avantage de se prêter aux grandes portées, surtout lorsque l'on dispose d'une hauteur importante.

C'est ainsi qu'on a établi, en 1875, le pont de Saint-Louis sur le Mississipi, dont la travée centrale a $158^{m},50$.

Nous avons, en Europe, trois grands ponts en arcs d'une portée encore plus grande. J'ai construit les deux premiers, qui sont exactement du même système: le pont du Douro à Porto et le viaduc de Garabit dans le Cantal.

Le premier, terminé en 1878, a 160 mètres de portée et le rail se trouve à $61^{m},28$ au-dessus du niveau de l'eau.

Le second a 165 mètres de portée et la voie passe à 122 mètres au-dessus du fond de la vallée.

Pour donner une idée de la hauteur de 122 mètres, je l'ai comparée à celle de la colonne Vendôme placée sur Notre-Dame ; c'est à une hauteur qui dépasse celle de ces monuments superposés qu'est placée la voie du chemin de fer. Il n'était naturellement pas possible d'élever des échafaudages à cette hauteur; le montage a dû être fait entièrement en porte-à-faux, en partant des deux côtés et en soutenant la construction par des faisceaux de

câbles en fils d'acier amarrés aux tabliers, lesquels étaient à leur tour amarrés à leurs extrémités dans les maçonneries.

Ce montage nécessitait une grande précision de fabrication, de mise en place et de calculs; il fallait, en effet, que les trous de jonction des deux moitiés de l'arc vinssent exactement se correspondre pour permettre le clavetage.

Nous y sommes arrivés avec une précision presque mathématique.

Le troisième pont a été, comme le premier, construit à Porto; il a 170 mètres de portée; il diffère du premier pont par la forme, mais la mise en place s'est effectuée à peu près de la même manière.

Je terminerai l'énumération des grands ponts métalliques par le pont de Forth, qui est en construction en Écosse et qui dépassera de beaucoup, comme dimensions, tout ce qui s'est fait jusqu'à ce jour.

Les deux travées centrales ont l'énorme ouverture de 517 mètres. Les piles ont une hauteur de 109 mètres; chacune d'elles supporte une grande console double, équilibrée en forme de balancier, ayant un porte-à-faux de 178 mètres. Aux extrémités de ces consoles s'attache, dans chacune des deux travées centrales, un tablier droit de 160 mètres de longueur.

La hauteur de la partie centrale, réservée au passage des navires, est de 45 mètres.

La longueur totale du pont est de 2,250 mètres, dont la partie centrale comprend deux travées de 517 mètres et deux travées de 205 mètres.

Les piles sont constituées par 92,000 mètres cubes de maçonnerie et le tablier par 45,000 tonnes d'acier.

Ce sera de beaucoup le plus grand ouvrage métallique qui ait jamais été construit.

Ce système nouveau, et dont les dispositions très ingénieuses sont combinées en même temps pour franchir de très grandes ouvertures et pour en permettre le montage, fait le plus grand honneur à l'ingénieur Baker, qui est un des principaux auteurs du projet.

Il m'est impossible de ne pas vous dire quelques mots des fondations à l'air comprimé, d'autant plus que c'est un Français, Triger, qui en est l'inventeur.

Le métal est ici employé à servir d'enveloppe à des blocs de maçonneries,

de dimensions parfois considérables, que l'on fait pénétrer peu à peu dans le terrain, au-dessous de l'eau, en chassant celle-ci par de l'air, qu'envoie une machine soufflante dans une capacité inférieure, qu'on nomme la chambre de travail et où les hommes opèrent l'extraction des déblais.

C'est au pont de Kehl, sur le Rhin, que la première grande application de ce procédé a été faite par deux ingénieurs français, MM. Vuigner et Fleur-Saint-Denis.

Depuis, ce procédé, qui permet d'atteindre des profondeurs de 35 mètres sous l'eau, a été employé d'une manière courante et il présente, dans les cas difficiles, une supériorité très grande sur les autres systèmes.

Ce n'est pas seulement dans la fondation des ponts qu'il trouve son application mais aussi pour celle des quais, comme à Anvers, et pour celle des bassins de radoub, comme à Toulon. Le caisson qui supporte le bassin de radoub de Toulon est le plus grand qui ait encore été construit; il a une longueur de 144 mètres et une largeur de 41 mètres. Il a été établi par M. Hersent et montre que, dans cette branche, toute française par son origine, de l'art de l'ingénieur, nous ne sommes encore distancés par personne.

L'emploi du métal dans les charpentes ne s'est pas développé aussi rapidement que dans les ponts; il ne s'imposait pas d'une manière aussi positive que dans ces derniers.

Le bois, employé dans les bâtiments où il est à l'abri de l'humidité, aurait une durée presque illimitée si le feu ne venait parfois détruire les constructions les plus considérables. C'est là une des causes de la préférence du fer au bois dans les premières charpentes métalliques que l'on a contruites.

Aujourd'hui, la légèreté que par l'emploi raisonné du métal on peut donner aux charpentes et le prix très réduit du fer permettent de réaliser des économies importantes sur les charpentes en bois. C'est à cela surtout qu'il faut attribuer la tendance, toujours plus marquée, à substituer, dans ces dernières, le fer au bois.

Le premier exemple remarquable de ces charpentes, que nous signale l'histoire de la construction métallique, est celle de la Halle aux Blés, à Paris, en 1809, et dont la toiture en bois avait été la proie des flammes.

La forme de cette charpente, qui vient de disparaître pour la construction de la Bourse du Commerce, était celle d'une calotte constituée au moyen de

voussoirs en fonte; on y trouve, comme dans les premiers ponts, l'application des principes des voûtes en maçonnerie.

Après ce premier essai, on est resté longtemps sans voir d'application importante du fer dans la charpente et il faut aller jusqu'en 1842, époque à laquelle Stephenson comprit le parti que l'on pouvait tirer du métal et construisit un grand nombre de charpentes pour différentes gares. La plus importante de celles-ci est la charpente de la station de Tythe-Bain, à Liverpool, qui a 43 mètres d'ouverture.

C'est à peu près de cette époque que date véritablement la charpente métallique, que l'on a appliquée ensuite à toutes les grandes constructions, et qui, sous forme de combles, dits Polonceau, du nom de l'ingénieur français qui les inventa, se répandirent peu à peu dans le monde entier.

L'un des plus beaux modèles de ces grandes fermes à été réalisé en France, en 1854, au Palais de l'Industrie, dont la grande nef, bien connue de vous tous, a une largeur de 48 mètres.

C'est vers la même époque qu'ont été construites les Halles Centrales, à Paris, qui font époque dans la construction, par l'usage remarquable que l'on fit de la fonte et du fer.

Elles créèrent en architecture un type absolument nouveau, qui a été suivi depuis dans un nombre considérable d'édifices et elles restent encore, depuis trente années, un modèle qu'il est difficile de surpasser et plus difficile encore de ne pas suivre.

Ce n'est plus guère, en effet, que sous cette forme que nous concevons maintenant la construction de halles ou de marchés.

De même que nous avons été, en France, les premiers à construire les ponts métalliques d'après des bases scientifiques, de même je crois que, sans exagération, l'on peut reconnaître que nous avons été les premiers à employer, pour des édifices de ce genre, le fer et la fonte avec autant de goût et d'habileté, en réalisant des constructions qui, comme les Halles Centrales, sont à la fois élégantes et grandioses.

Si l'on prend, l'une après l'autre, toutes les grandes expositions : celles de Paris, celles de Londres, celles de Vienne, on y trouve presque exclusivement le fer employé pour les fermes, les piliers et toutes les charpentes.

On voit, dès maintenant aussi, l'importance de ce métal dans la prochaine Exposition de 1889.

Je dois parler d'abord de l'une de ses parties principales, la galerie des machines. Ce sera une halle immense, dont la longueur atteindra 400 mètres, la hauteur 45 mètres et dont les fermes auront 110 mètres d'ouverture, dépassant ainsi tout ce qui a été fait jusqu'à présent.

La gare de Saint-Pancras, à Londres, dont les fermes sont les plus grandes qui existent, n'a que 73 mètres d'ouverture et seront ainsi mises au second rang.

Cette belle charpente de la galerie des machines a été étudiée dans son ensemble, sous la haute direction de M. Alphand, par M. Dutert, architecte et toutes les parties métalliques en ont été projetées et calculées par M. Contamin, ingénieur en chef de l'Exposition.

En dehors des ponts et des charpentes, un grand nombre d'autres constructions sont tributaires du métal.

Les navires ne sont en ce moment que d'immenses constructions métalliques. Non seulement leur structure entière est établie en fer ou en acier, mais encore leurs plaques de protection utilisent ces métaux dans des proportions considérables. Nos cuirassés actuels semblent avoir atteint, à ce point de vue, le dernier degré de la perfection, tant comme solidité que comme résistance, et c'est par milliers de tonnes que le fer ou l'acier entre dans chacun d'eux.

Leurs puissants canons sont protégés par des coupoles mobiles qui mettent les servants des pièces à l'abri du feu de l'ennemi, tout en leur permettant de tirer dans toutes les directions.

Ces mêmes coupoles métalliques se retrouvent dans l'artillerie de terre, pour l'armement des nouveaux forts.

A côté de ces coupoles destinées à la guerre, vous me permettrez de vous dire un mot d'autres coupoles destinées à la science. Je veux parler en particulier de la coupole de l'Observatoire de Nice, qui est la plus grande qui existe. Elle a $22^{m},40$ de diamètre et présente cette particularité qu'elle flotte sur un liquide, ce qui la rend d'une mobilité telle qu'un seul homme peut facilement la faire tourner à la main, quoique son poids dépasse cent mille kilos.

Dans les travaux hydrauliques, le métal ne joue pas un moindre rôle. Il est employé pour la construction des docks flottants, des phares, des jetées, des barrages et des écluses.

Parmi ces dernières je citerai les écluses du canal de Panama, que nous construisons actuellement et qui seront de dimensions tout à fait exceptionnelles. Les portes sont constituées par un vantail unique de 24 mètres de largeur sur 21 mètres de hauteur et 4 mètres d'épaisseur.

Elles supportent, en charge normale une dénivellation de 11 mètres, mais elles sont calculées de manière à pouvoir résister exceptionnellement à la charge énorme de 21 mètres d'eau. Elles seront flottantes et rouleront à leur partie supérieure sur des ponts tournants, qui se déplaceront pour donner passage au navire. Les murs des écluses, qui, d'ordinaire, sont en maçonnerie, seront, dans celles-ci, complètement métalliques.

Il me reste enfin à vous dire un dernier mot sur une construction toute spéciale, qui est la Tour de l'Exposition. Cette Tour aura une hauteur de 300 mètres, laquelle dépasse presque du double celles de tous les monuments connus.

Elle sera, en même temps que la réalisation la plus complète de tous les progrès qu'a faits, dans ces dernières années, la construction métallique, l'une des principales attractions de l'Exposition.

L'intérêt et la curiosité qu'elle excite dans le monde entier justifient son rôle à ce point de vue. Il m'est rapporté de diverses sources, que, même dans la Chine et dans l'Inde, la construction de cette Tour, qui sera le plus haut édifice sorti de la main des hommes, a frappé l'imagination de tous et je suis heureux de constater qu'elle sera un des éléments importants du succès que nous désirons tous à notre grande Exposition.

Voilà donc déjà une utilité réelle et positive. Mais la Tour a d'autres titres encore pour se recommander à l'attention publique, en raison des incontestables services qu'elle rendra à la science. Je puis m'appuyer, à ce sujet, sur l'opinion de savants très considérables, qui, dès l'origine du projet, l'ont patronnée de leurs sympathies. Je veux parler de M. Hervé-Mangon, président de la Société de météorologie, de M. l'amiral Mouchez, directeur de l'Observatoire, du regretté général Perrier, de M. Pierre-Puiseux, astronome, de M. le colonel Laussedat, notre éminent président, de MM. Marey et Cailletet, de l'Institut, etc., etc.

J'ai rencontré, du reste, peu de savants qui n'aient en vue une expérience spéciale, qu'ils se proposent de faire à l'aide de la Tour et qui n'aurait pu être réalisée sans elle. Je citerai brièvement les principales.

Météorologie : Vitesse et pression du vent à différentes hauteurs, loi de décroissance de la température avec la hauteur, état hygrométrique et analyse de l'air suivant l'altitude, mesure du potentiel de l'électricité atmosphérique, etc.

Astronomie : Examen des raies telluriques du soleil, photographie et spectroscopie stellaire, qui se feront dans des conditions particulièrement favorables, en raison de ce que le sommet de la Tour sera placé au-dessus des brumes superficielles, etc.

Physique : Étude de la déviation d'un corps qui tombe, expérience du pendule de Foucault, installation de grands manomètres permettant d'étudier les lois de compression des gaz, graduation directe de manomètres étalons jusqu'à 400 atmosphères, etc.

Physiologie : Étude de l'air atmosphérique au point de vue des bactéries, influence sur la circulation du sang, de l'air à cette hauteur, recherches sur le vol des oiseaux, etc.

Enfin, *au point de vue militaire*, la Tour fournira un observatoire précieux. Elle est, en effet, à une hauteur double de la plate-forme du mont Valérien et elle permet, soit par la vision directe, soit par la télégraphie optique, d'établir des communications qui n'existent pas encore et sur lesquelles on comprendra que je n'insiste pas davantage.

En résumé, elle ne sera pas simplement un sujet de curiosité pour le public, soit pendant l'Exposition, soit après, mais elle rendra encore de signalés services à la science et à la défense nationale.

Son utilité et sa raison d'être me semblent amplement justifiées par les indications qui précèdent.

Il ne me reste plus qu'à vous dire deux mots sur l'état d'avancement des travaux.

La Tour, commencée le 1er février 1887, est arrivée actuellement à la hauteur de 58 mètres au-dessus du sol du Champ-de-Mars. La période difficile est franchie depuis que, d'une part, les importantes fondations de l'ouvrage, faites à l'air comprimé jusqu'à 14 mètres de profondeur, sont terminées dans d'excellentes conditions et, d'autre part, que les quatre grands piliers inférieurs sont réunis par les poutres horizontales qui vont supporter le premier étage. Cette opération de jonction des piliers avec les poutres s'est faite avec une précision absolue, grâce aux dispositions prévues dès l'origine, qui,

par l'emploi combiné de presses hydrauliques de 800 tonnes et de boîtes à sable, permettaient de soulever chacun de ces piliers et, par conséquent, de régler exactement sa position dans l'espace.

Actuellement le plancher du premier étage s'achève, le montage du prolongement des piliers va être repris. Il ne présente pas de difficultés exceptionnelles et je suis, dès maintenant, certain que pour le 14 juillet prochain nous aurons atteint le deuxième étage et qu'à la fin de la présente année l'ossature entière sera arrivée à sa hauteur définitive.

L'ouvrage complet avec ses parachèvements sera donc assurément prêt pour l'ouverture de l'Exposition pendant la durée de laquelle il montrera au monde que la France continue à tenir un des premiers rangs dans l'art des constructions métalliques.

IMPRIMERIE CENTRALE DES CHEMINS DE FER. — IMPRIMERIE CHAIX. — RUE BERGÈRE, 20, PARIS. — 10428-5-8.